

Walter Andrew Shewhart, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*,
(1931)

Denis Bayart

juillet 2003

à paraître en anglais dans :

Grattan-Guinness I (editor) : *Landmark Writings in Western Mathematics, 1640-1940*.

Note hors texte :

en vue de la traduction, j'ai laissé quelques mots en anglais quand ils sont conformes à l'usage qu'en fait l'auteur.

"statistic" est le terme qu'il emploie, je n'ai pas traduit

l'illustration est propriété de Bell Telephone Laboratories, Lucent Technologies, Corporate Headquarters: 600 Mountain Avenue, Murray Hill, NJ 07974

First publication. New York: Van Nostrand ; London: Macmillan, 1931. xiv + 501 pages, illus., diags. 24 cm

Photoreprint. "50th anniversary commemorative reissue". Milwaukee, Wis.: American Society for Quality Control, 1980. xiv + 501 p., illus., 24 cm., ISBN: 0873890760

Spanish translation. Control económico de la calidad de productos manufacturados, Madrid, Spain: Diaz de Santos, 1997, I.S.B.N. 84-7978-304-4

(pas de traduction connue en allemand ni russe)

1. Le problème industriel du contrôle statistique de la qualité

"Economic Control of Quality" est le premier ouvrage d'envergure traitant spécifiquement du contrôle des processus industriels de fabrication à l'aide des méthodes et raisonnements de la statistique mathématique (théorie des distributions et échantillonnage). Cette introduction de l'analyse mathématique dans le champ des opérations industrielles conduira notamment au statistical process control et à la théorie statistique de la décision.

Le développement des fabrications en grande série dans l'industrie au XXe siècle a amené des difficultés pour contrôler la qualité des produits fabriqués. Les produits étaient en trop grand

nombre pour pouvoir être contrôlés individuellement ; parfois, le contrôle supposait leur destruction (munitions). D'autres fois encore, le contrôle nécessitait des opérations longues en laboratoire, qui ne permettaient pas de réagir rapidement pour corriger des erreurs constatées.

Dans ce contexte, la statistique et le calcul des probabilités ont fourni des méthodes rationnelles pour contrôler la production sur échantillons. Les probabilités apportaient la possibilité de calculer le risque d'une mauvaise décision au vu d'un échantillon de taille donnée. Ces calculs ont causé bien des surprises car on a toujours tendance, intuitivement, à surestimer la représentativité d'un échantillon. Ainsi, pour juger de la qualité d'un lot, on prenait couramment un échantillon de 2% de la taille du lot, ce qui était beaucoup trop faible pour fonder un jugement valable. On a aussi redécouvert la loi de Poisson en s'apercevant que l'échantillon ne devait pas nécessairement être proportionnel à l'effectif du lot.

Plusieurs méthodes sont ainsi apparues dans les années 1920 de façon indépendante dans différents pays industrialisés. Les mathématiques utilisées ne sont pas particulièrement nouvelles, et il semble qu'on aurait pu inventer cela bien avant. Ce sont donc très certainement les conditions économiques et industrielles qui ont poussé au développement de ces méthodes à cette époque précise.

W.A. Shewhart (1891-1967) est celui qui a produit l'oeuvre la plus originale et la plus approfondie à cette époque. Physicien de formation (PhD de physique de l'Université de Californie à Berkeley en 1917), il est embauché à la Western Electric Company (1918), puis en 1925 aux Bell Telephone Laboratories, dont il restera salarié jusqu'à sa retraite en 1956. A côté des statistiques, il s'est intéressé à la standardisation en liaison avec plusieurs grandes associations d'ingénieurs. Il fut un acteur important de la communauté des statisticiens aux Etats-Unis : founding member of the Institute of Mathematical Statistics and president (1937, 1944), president of the American Statistical Association (1945). Il fut également le premier *editor* de la série *Wiley Publications in Statistics*, où il mit l'accent sur les statistiques appliquées. Ses travaux ont été également transposés dans le champ du management par le statisticien et consultant W.E. Deming ; ils ont connu un grand succès au Japon, où ils ont contribué à l'essor industriel des années 1970 (Quality Circles, Total Quality Control), avant d'être réimportés aux Etats-Unis dans les années 1980.

2. Une approche par la physique statistique

Le problème auquel s'attaque Shewhart est celui de la variabilité des grandeurs physiques mises en jeu dans les procédés industriels. Il montre que cette variabilité peut expliquer la mauvaise qualité des produits. En effet, la bonne qualité d'un produit est définie par sa conformité à un ensemble de spécifications et de tolérances (dans ces approches, la qualité des produits industriels est toujours supposée mesurable). Les équipements de fabrication, les matières premières, les opérations manuelles introduisent dans le procédé une variabilité que l'on ne mesure pas et qui peut être incompatible avec les tolérances imposées.

Shewhart va étudier cette variabilité en la considérant comme une propriété du système de production, et en la représentant par une distribution statistique dont on peut estimer les paramètres. Mais pour qu'une telle hypothèse soit valable, il faut que le système de production soit dans un état stationnaire que Shewhart conceptualise sous le nom de "constant system of chance causes". En général, un équipement de production dans une usine n'est pas dans cet état. Pour l'y amener, il faut identifier des "causes assignables de variation" et les éliminer afin de réduire la variabilité et de régulariser la production. La référence à Laplace (Théorie analytique des probabilités) est explicite dans les premières réflexions.

La dimension économique mentionnée dans le titre de l'ouvrage intervient à travers un raisonnement coût-bénéfice. La recherche et l'élimination des causes assignables de variation a un coût, qu'il faut comparer aux avantages retirés d'une amélioration de la qualité. En outre, les phénomènes physiques présentent une variabilité naturelle (pour Shewhart, toutes les grandeurs physiques sont de nature statistique) qu'il n'est "pas raisonnable" de chercher à réduire. La recherche de la précision bute ainsi sur un obstacle à la fois physique et économique, qui impose des limitations à ce que l'industrie est capable de produire en termes de qualité.

A côté de la théorie, Shewhart a aussi conçu des outils cognitifs qui sont une aide indispensable à la mise en oeuvre de la démarche : ce sont les "control charts" (fig. 1). Le control chart est une invention remarquable qui rend visible à la fois l'évolution des caractéristiques de qualité de la production et les limites qu'elles ne doivent pas franchir. Les limites représentent la variabilité naturelle du système. Si elles sont franchies à un certain moment, cela signifie que le système n'est plus dans le même état stationnaire, qu'une cause extérieure de variabilité est intervenue avec un effet important, et qu'il faut lancer une enquête pour l'identifier.

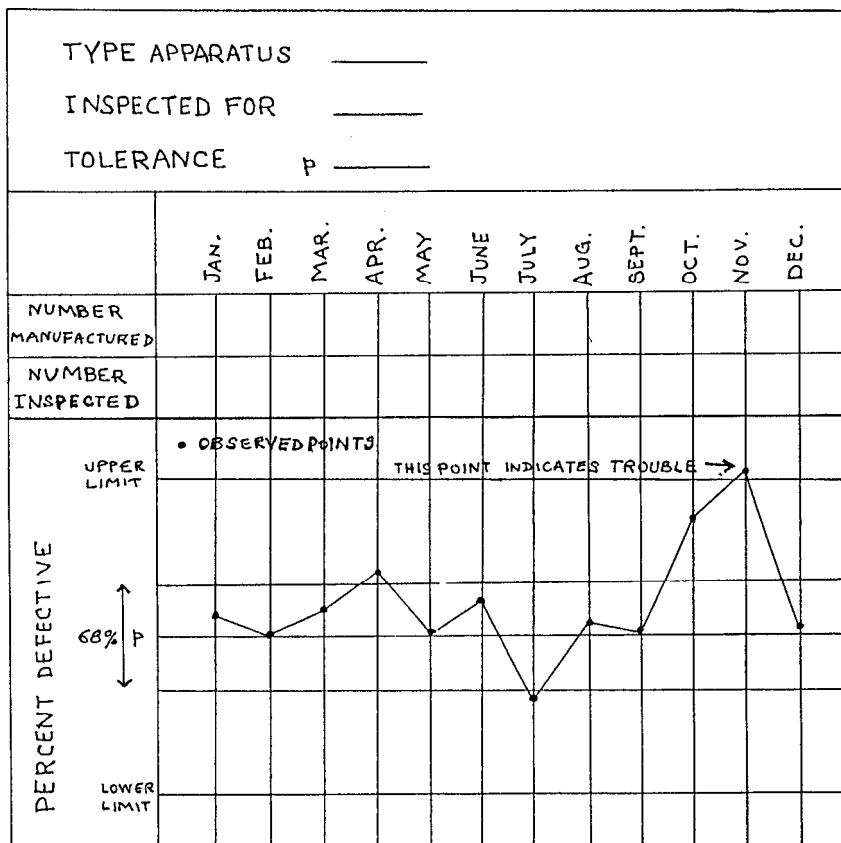


fig. 1 : la première forme de la carte de contrôle (1924)

3. Des mathématiques qui dialoguent avec la pratique industrielle

Le lecteur de Shewhart sera peut-être surpris par les mathématiques qu'il y trouvera car son oeuvre ressemble plus à de la physique ou à de l'ingénierie. Pourquoi donc l'avoir inclus dans les "landmarks of mathematics" ?

Une première raison est que c'est bien ce livre qui a ouvert la voie à des milliers de travaux et d'enseignements sur le Statistical Process Control. Une deuxième raison est que Shewhart fait des mathématiques un usage tourné vers la pratique, sans que cela apparaisse comme une

"application" brutale de formalismes ou de calculs. Il instaure un dialogue entre théorie mathématique et expérience en soulignant scrupuleusement leurs limites respectives ainsi que les compromis qui sont nécessaires pour l'action. Ces compromis sont raisonnés à travers le point de vue "économique", prenant en compte le coût d'acquisition de l'information, le coût de l'action, mis en regard avec les bénéfices attendus. Bien que ces aspects ne soient pas très développés, on peut voir chez Shewhart les prémisses des mathématiques de la décision.

Sur le plan mathématique, Shewhart mobilise surtout les éléments suivants :

- théorie mathématique des distributions statistiques (usage fréquent des 4 premiers moments et d'estimateurs variés)
- identification des distributions à partir d'observations empiriques, notamment par les méthodes de Pearson et de Gram-Charlier
- théorie de l'échantillonnage et des distributions des *sample statistics*.

Les travaux de Shewhart ont une dimension sociale, tenant à leur domaine d'utilisation, l'industrie : ils introduisent la statistique mathématique dans l'usine, la confiant à une main d'oeuvre ouvrière peu formée aux mathématiques. C'est là un tour de force, accompli grâce à la control chart qui transforme en métaphore visuelle le raisonnement d'induction statistique à partir des échantillons.

Il faut encore souligner que ce travail a été accompli pour le compte de la grande entreprise de téléphone américaine AT&T, à la demande et avec le soutien de dirigeants, avec les moyens matériels et humains très riches dont disposaient les départements de recherche et d'ingénierie. Si Shewhart signe seul, la mention "Member of the Technical Staff, Bell Telephone Laboratories, Inc." figure très visiblement sous son nom en page de titre. Cette insertion dans l'entreprise lui a permis d'accéder à des données réelles et de se prévaloir d'une expérience industrielle pour faire dialoguer théorie statistique et expérience pratique.

Shewhart a aussi beaucoup échangé avec ses collègues, notamment Harold F. Dodge, qui travaillait lui aussi sur le contrôle statistique, mais par une autre voie (sampling inspection), ainsi que les bons connaisseurs des probabilités et statistiques qu'étaient TC Fry et EC Molina. Les travaux de Shewhart ont d'abord fait l'objet de Out-of-Hour Courses in Bell Telephone Laboratories, dont les services techniques ont permis la réalisation des nombreux graphiques,

tableaux et diagrammes qui sont un apport considérable. Enfin, les Bell Laboratories disposaient d'un journal scientifique, le Bell System Technical Journal, qui a publié plusieurs articles sur ces méthodes nouvelles.

Shewhart, à la suite de "Student", a ainsi contribué à ouvrir aux mathématiques le champ des applications industrielles. Les nouvelles contraintes suggérées ou imposées par le terrain industriel ont stimulé la créativité des statisticiens, qui ont produit des avancées théoriques importantes. Rappelons par exemple que la théorie statistique de la décision de Wald est un développement de l'analyse séquentielle (Sequential Analysis), elle-même une réponse à un problème de contrôle statistique de qualité soulevé pendant la IIe guerre mondiale par un officier d'intendance (Wald, 1947).

4. Présentation de l'ouvrage

Le livre comprend 25 chapitres répartis en 7 parties, plus 3 annexes. Nous suivrons l'ordre des parties, dans la mesure où il correspond à une progression méthodique à travers les différents aspects de la démarche.

L'introduction (partie I, 3 chapitres) est très étoffée. Elle constitue à elle seule une synthèse de l'ensemble, présentée pour un public scientifique ou cultivé. Shewhart y expose, de façon très systématique, les hypothèses sur lesquelles il fonde sa méthode. Les principales concernent le concept de "constant system of causes", qu'il construit par une méthode d'abstraction fondée sur des relations d'équivalence entre les systèmes. Il choisit des exemples de systèmes aléatoires reconnus en sciences physiques pour transférer les modes de raisonnement aux systèmes industriels. Sont également présentés le principe de la carte de contrôle et les différents avantages que l'industrie peut retirer du contrôle statistique de la qualité.

La partie II (Ways of Expressing Quality of Product, 6 chapitres) est un exposé de statistique descriptive adaptée à des données de production industrielle. Quelles sont les différentes manières de présenter des données exprimant la qualité des fabrications ? Quels critères mettre en évidence pour faciliter le jugement ? L'ordre dans lequel les mesures sont recueillies est essentiel lorsqu'il s'agit de juger si la série résulte d'un système au comportement aléatoire ou non. Un chapitre est consacré aux tableaux, graphiques et diagrammes, un autre aux expressions

analytiques, et un autre encore à l'expression des relations (corrélations). Cette partie correspond aux travaux d'un comité de normalisation créé en 1929, auquel Shewhart a contribué. Les propositions de ce comité furent plus tard reprises comme standards par l'American Standards Association. C'est un exemple de l'investissement de Shewhart au niveau des institutions de normalisation pour la mise en forme des données statistiques.

La partie III (Basis for Specification of Quality Control, 3 chapitres) approfondit les fondements théoriques du nouveau concept de contrôle et propose une caractérisation du "contrôle maximum". Cet état est défini "as the condition reached when the chance fluctuations in a phenomenon are produced by a constant system of a large number of causes in which no cause produces a predominating effect" (p. 151). Une cause qui prédomine sur les autres est dite "assignable cause of Type I".

Etablir qu'un système est en état de contrôle soulève des difficultés fondamentales : un tel état ne peut être caractérisé de façon positive car il faudrait pouvoir observer son fonctionnement pendant un temps infini. On ne peut qu'en faire l'hypothèse et la soumettre à l'expérience. A défaut de condition suffisante pour l'état de contrôle, on a la condition nécessaire que "differences in the qualities of a number of pieces of a product *appear* to be consistent with the assumption that they arose from a constant system of chance causes" (p. 146).

La partie IV (Sampling Fluctuations in Quality, 4 chapitres) est consacrée à l'échantillonnage, théorie et pratique. Shewhart exploite les résultats de la statistique mathématique britannique pour établir les relations entre la distribution d'origine et les sampling distributions pour plusieurs estimateurs de tendance centrale et de dispersion. Par exemple, il établit une table de coefficients permettant de passer par simple multiplication de la moyenne observée pour l'écart-type des échantillons à l'écart-type de la distribution de la variable.

Il utilise aussi une approche expérimentale à l'aide d'urnes de composition contrôlée. D'abord une urne dont la composition simule une loi normale (discretisée de façon à être représentée par 998 jetons marqués selon les valeurs de la variable aléatoire) lui permet de produire des résultats expérimentaux sur les échantillons et de vérifier l'accord entre théorie et expérience. Il réalise 4000 tirages dans cette urne, reproduits en annexe du livre.

Une deuxième urne est constituée par une population à distribution rectangulaire, c'est-à-dire uniforme entre 0 et 1. Une troisième représente une distribution triangulaire avec maximum à droite. Là aussi, 4000 tirages sont effectués dans chaque urne et publiés. Ils servent principalement à éprouver la robustesse des formules analytiques reliant la distribution d'origine et les sampling distributions lorsque la première n'est pas normale. Ces expériences apportent une conclusion très importante pour la pratique : les échantillons de taille $n = 4$ apparaissent robustes. Ce nombre 4 figure depuis lors dans tous les manuels comme un fétiche (ou parfois 5, les calculs étant plus faciles). Le concept sous-jacent est celui de "sous-groupe rationnel" (voir §5).

Dans la partie V, Shewhart se penche sur la formulation des spécifications de production (Statistical Basis for specification of Standard Quality, 2 chapitres). Dans le premier, il traite sous un angle statistique le problème de l'empilement des tolérances, important pour la conception des produits. Puis il propose de définir les spécifications de qualité par une distribution, sa moyenne et son écart-type. C'est là encore un travail de mise en forme qui vise à élaborer de nouveaux standards pour l'industrie.

La partie VI (Allowable Variation in Quality, 3 chapitres) explicite la théorie des cartes de contrôle et les critères de construction (voir §5 ci-dessous).

La partie VII (Quality Control in Practice, 4 chapitres) est hétérogène. On y trouve un chapitre qui traite des aspects pratiques de la prise d'échantillon, et un autre des mesures en physique plutôt destiné aux métrologistes. Les deux autres reprennent des conclusions très générales et plutôt abstraites, dans lesquelles Shewhart exprime sa "philosophie" du contrôle et de la recherche des causalités.

En annexe, l'auteur étudie différents systèmes constants de causes non normaux et leur convergence vers la normalité avec l'augmentation du nombre de causes. Les résultats des tirages dans les trois types d'urnes permettent au lecteur de faire ses propres expériences et de développer son intuition de la variabilité des échantillons. Enfin, la bibliographie commentée très complète est un précieux document pour les historiens.

5. Allowable Variability in Quality

La pierre de touche de la méthode de Shewhart se trouve ici, car c'est un résultat opérationnel qui est visé : peut-on effectivement réduire la variabilité des systèmes, et par quels moyens ? Shewhart distingue deux types de situations.

Le premier type est celui où le "standard" de qualité est donné a priori, dans les spécifications, sous forme statistique (moyenne et écart-type, forme de la distribution). A partir des paramètres de la distribution spécifiée, on peut calculer les limites entre lesquelles devraient varier (avec une probabilité que l'on choisit proche de 1) la moyenne et l'écart-type d'un échantillon de taille n qui serait tiré de cette population. Un échantillon pour lequel la statistique calculée n'appartient pas à l'intervalle prescrit indique, avec une forte probabilité, que le système ne suit pas la distribution spécifiée. On est alors à même de poursuivre l'enquête dans le monde physique pour remonter à l'origine de cette variation et l'éliminer. Le tout est soumis à des aspects "économiques", par un raisonnement coût-bénéfice.

La discussion sur le choix des limites de contrôle illustre particulièrement bien la manière dont Shewhart fait dialoguer théorie et expérience. La distribution spécifiée sert essentiellement à démontrer l'existence de limites de contrôle optimales du point de vue économique. Mais pour le calcul de ces limites, c'est l'expérience qui joue, avec le souci de simplification et d'uniformisation des procédures. En définitive, Shewhart préconise de fixer les limites à 3σ (écart-type) de part et d'autre de la moyenne de la distribution. Pour justifier cela, il s'appuie sur la convergence assez rapide vers la loi normale de la plupart des distributions d'échantillonnage. Le choix de 3σ correspond à une probabilité .003 de prendre une mauvaise décision, ce qui est tout à fait acceptable pour la pratique. Il s'appuie aussi, lorsque la loi est quelconque, sur le théorème de Tchebycheff, sans toutefois développer le fait que le risque d'une mauvaise décision est alors plus élevé.

Le deuxième type de situation est beaucoup plus intéressant et novateur : il s'agit d'amener le système en état de contrôle maximum, de sorte que la norme soit une propriété du système lui-même, et non plus seulement une donnée exogène.

La difficulté principale, dans ce cas, vient de ce que l'on ne sait rien de précis concernant une éventuelle loi statistique du phénomène. Il faut l'approcher progressivement.

Pour commencer, il faut constituer des "sous-groupes rationnels" à partir des données. C'est cette opération qui représente la connaissance d'ingénierie que l'on possède au départ sur le

système. Ces sous-groupes doivent faciliter la découverte des causes de variation (par exemple, distinguer les produits selon le fournisseur). Ce concept, encore embryonnaire dans le livre, a été formulé plus précisément dans (A.S.T.M. 1935, §4) : "*within* (a subgroup) the variations may be considered on engineering grounds to be due to nonassignable chance causes only, but *between* (subgroups) the differences may be due to assignable causes whose presence is suspected or considered possible".

L'étape suivante est la construction d'une carte de contrôle pour une *statistic* jugée convenable (moyenne, écart-type, taux de défectueux, etc.). A partir des échantillons, on estime les paramètres de la distribution de cette *statistic*, dont on se sert pour calculer des limites de contrôle à $\pm 3\sigma$.

Cette première carte de contrôle permet de détecter des causes assignables de variation. Celles-ci étant éliminées, on reprend le processus : sous-groupes rationnels, échantillons, calcul de nouvelles limites de contrôle. Celles-ci, étant plus resserrées que les précédentes, font apparaître de nouvelles causes assignables de variation. Et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on atteigne un état de contrôle maximum ou bien que l'on estime qu'il n'est plus intéressant, économiquement, de poursuivre l'amélioration.

Notons, sans entrer dans le détail de méthodes plutôt complexes, la possibilité de mettre en évidence des "assignable causes of Type II", présentes dans un système qui semble être en état de contrôle. Ce sont par exemple des causes de variation qui ont un effet de groupe (causes corrélées) et ne sont pas repérables individuellement.

6. Les répercussions, la réception

La publication du livre de Shewhart n'a au départ touché que les statisticiens et quelques spécialistes. Karl et Egon Pearson l'invitent à Londres en 1932 avec l'aide de la British Standards Institution. Le domaine est jugé assez important pour que soit créée une section spéciale de la Royal Statistical Society consacrée aux applications agricoles et industrielles, ainsi qu'une série spécialisée de la revue. En 1935, E. S. Pearson publie sous couvert de la BSI un manuel qui reprend les travaux de Shewhart avec certains perfectionnements et changements (Eisenhardt, D.S.B.).

Shewhart n'a publié que deux livres dans sa vie. Le second est un ensemble de conférences prononcées dans une école d'agriculture en 1938, recueillies et mises en forme par WE Deming,

qui avait organisé les conférences. Shewhart y développe sa pensée sur des sujets de nature métrologique, de façon souvent déconcertante mais indéniablement profonde. Il est très influencé par la philosophie pragmatiste du logicien Clarence I. Lewis et par l'opérationnalisme du physicien P. Bridgman.

C'est cependant l'industrie de guerre qui assure la diffusion large du contrôle statistique de qualité dans l'industrie, aux Etats-Unis comme en Grande-Bretagne, sous l'impulsion des gouvernements qui y voient les avantages techniques et économiques de la rationalisation de la production. Des programmes de formation importants sont mis sur pied.

Après la guerre, le plan Marshall diffuse en Europe continentale ces méthodes d'organisation industrielle. C'est cependant au Japon qu'elles ont le plus d'écho. Introduites par l'Administration MacArthur, elles sont reprises par les industriels qui en font un cheval de bataille avec le succès que l'on sait.

Références

A.S.T.M. 1935. *Supplement B: "Control Chart" Method of Analysis and Presentation of Data*, in: *Manual on Presentation of Data*, Philadelphia: American Society for Testing Materials. Repr. 1937.

Bayart, D. 2000. 'How to Make Chance Manageable : Statistical Thinking and Cognitive Devices in Manufacturing Control', in: Levin, M. R. (ed) 2000. *Cultures of Control*, Amsterdam (NL): Harwood Academic Publishers, 153-176

Deming, W. E. 1978. 'Shewhart, Walter A.', in: Kruskal, W. (ed): *International Encyclopedia of Statistics*, New York, vol. 2, 942-944

Eisenhardt, C. 'Shewhart, Walter Andrew', in: *Dictionary of Scientific Biographies*, vol. 18, Supp. II, 816-819

Fagen, M.D. (ed) 1975. *A History of Engineering and Science in the Bell System, The Early Years (1875-1925)*, New York: Bell Telephone Laboratories

Grant E.L., Leavenworth R.S. 1972. *Statistical Quality Control*, McGraw Hill, International Student Edition

Hald, A. 1981. *Statistical Theory of Sampling by Attributes*, New York: Academic Press
Industrial Quality Control, Vol. 24 (1967), Shewhart special issue

Juran, J. M. 1997. 'Early SQC: A Historical Supplement', *Quality Progress*, 30(9), 73-81.

Littauer, S.B., 1950. 'The Development of Statistical Quality Control in the United States', *The American Statistician*, December, 14-20

Pearson, E.S. 1935. *The Application of Statistical Methods to Industrial Standardisation and Quality Control*, London: British Standards Institution

Shewhart, W.A. 1924. 'Some Applications of Statistical Methods to the Analysis of Physical and Engineering Data', *Bell System Technical Journal*, vol. III, 43-87

Shewhart, W.A. 1939. *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*, Washington: The Graduate School, U.S. Department of Agriculture. Repr. Dover Publications, 1986, ISBN: 0486652327

Wald, A. 1947. *Sequential Analysis*, New York: Wiley